

車間距離測定プローブカーの長期観測に基づく ネットワーク交通流のノンパラメトリック推定

瀬尾 亨¹・朝倉 康夫²

¹学生会員 東京工業大学 大学院理工学研究科 土木工学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-20)
E-mail: t.seo@plan.cv.titech.ac.jp

²正会員 東京工業大学教授 大学院理工学研究科 土木工学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-20)

車間距離測定技術とは、車載機により先行車両のリアルタイム検知・測距を行うもので、運転支援や自動運転といった自動車工学分野での応用例が普及し始めている。一方、車間距離は交通流観測の観点からも非常に重要な状態量であり、パッシブ型モバイルセンシングデータとしての交通工学分野での応用も期待される。例えば、この技術をプローブカーの観測手段として組み込むことにより、定点観測や外生的仮定に頼らない単路部の交通流率等の推定手法が示されている。本研究はこれをネットワークへと拡張し、車間距離測定プローブカーの観測情報のみに基づくリンク旅行速度、交通量やOD間交通量の推定手法を構築した。この際、現在の観測情報に基づき観測リンクの状態を推定し、加えて長期に渡って蓄積された過去の観測情報を活用することで未観測リンクの状態を推定した。

Key Words : probe vehicle, Lagrangian observation, OD flow, advanced driving assistance technology

1. はじめに

(1) 背景

a) 交通観測・推定に関する既往研究

都市の道路ネットワーク交通流の状態を把握することは、交通マネジメント上非常に重要である。把握すべき情報の代表例としては、リンク旅行速度、リンク交通量、Origin-Destination (OD) 間交通量等が挙げられる。しかし、これらの情報をネットワーク全体に渡り高い分解能で観測する事は困難である。例えば日本では、都市域高速道路は車両感知器等により高品質な常時モニタリングがなされている一方、主要一般道ネットワークは数年規模の時間間隔で行われる調査（道路交通センサス等）で観測されているのみで時間・空間分解能の高い観測はなされていない。

移動体観測は、空間的にネットワーク全体に渡る情報の収集が可能なることから、交通流の観測・推定に大きな役割を果たすと期待されている。今日では、Global Positioning System (GPS) を装備して位置・速度を測定する車両、GPS プローブカーが幅広く用いられている。しかし、GPS プローブカーのみでは密度・流率といった量に関する状態量の観測が不可能であり、その推定にはなんらかの外生的仮定が必要となる。関連する先行研究として、例えばリンク $q-k$ 関係を仮定して GPS プローブカーの旅行速度情報から OD 交通量を動的に推定する研究¹⁾がある。また、一般的には、ある特定の時

間帯についてみると、プローブカーはネットワーク中の一部リンクのみを走行している。そのため、観測されていないリンクの情報を補完する必要があり、利用者均衡を仮定して旅行時間を推定する研究²⁾や、過去の観測情報に基づく機械学習により推定する研究³⁾等が行われてきた。

b) 車間距離測定プローブカー

近年、運転支援技術の開発・実用化が始まっている。この技術は、走行中の車両の周囲の状況を自動で認識し、高速巡航、障害物回避、完全自動運転等を実現するものである⁴⁾。このときに認識される「走行中の車両の周辺状況」とは車間距離等の情報であり、交通流観測の観点からも非常に重要な情報である（例えば、小谷ら⁵⁾は車間距離を測定する実験車両の観測結果から交通容量を連続的に推定している）。運転支援技術を装備した車両が普及した場合、それらの車両が解析した情報を通信を介して集約することにより、パッシブ型モバイルセンシングとしての活用が可能と考えられる。特に、現在の移動体観測のみでは観測できない流率・密度といった量的な情報の観測・推定が期待される。

このような観点から、著者らは本技術を搭載した車両のプローブカーとしての活用する方法を「車間距離測定プローブカー」と呼称し、プローブカーによって観測される位置および車間距離から交通流状態を推定する手法を構築、検証している⁶⁾。同手法は単路部への適用に留まっていたが、それをネットワークへ拡張する

ことが課題のひとつであった。

(2) 目的

本研究の目的は、車間距離測定プローブカーによる移動体観測のみに基づいてネットワーク交通流の推定を試みることである。単一の観測リンクの流率、密度、速度の推定手法は既に構築、検証されていることから、本研究では新たに OD 別交通量の推定手法（第 2 章 (2) 節）を提案し、未観測リンクの交通流状態の補完手法（同 (3) 節）を提案する。観測リンク状態の推定はプローブの現在の観測情報を活用し、未観測リンク状態の補完では長期間に渡って蓄積された過去観測情報を活用することで、 q - k 関係といった仮定を置かない推定手法を構築する。

2. 推定手法

(1) 想定状況

ある一定の割合の車両が車間距離測定プローブカー（以下、単にプローブと呼ぶ）としての役割を担い、ネットワーク中を繰り返し走行している状況を想定する。プローブはその走行中に

- 自車の位置
- 前車との車頭距離

を時間連続的に正確に観測すると仮定する。プローブの起点ノードおよび終点ノードは車両 ID とともに常に参照できるものとする。また、プローブは全車両から均一にサンプリングされており、その挙動は非プローブと同一とみなせるとする。このとき、プローブが観測する情報は時空間図上に図-1 のように表すことができる。このネットワークは 3 ノード 2 リンクからなり、ノード 1 が起点ノード、2 が起点かつ終点ノード、3 が終点ノードである。OD ペアは 1→2、1→3、2→3 である。赤太線はプローブの軌跡、黒線は非プローブの軌跡、実線は OD ペアが 1→3 である車両の軌跡、破線は OD ペアが 1→2 または 2→3 である車両の軌跡、赤領域はプローブが観測するそれぞれの先行車両までの時空間領域を意味する。

ネットワークの形状、起点ノード、終点ノードは既知であるとする。このネットワーク上を長期間（たとえば 1 年）に渡り車両が繰り返し走行するとする。ただし、需要・供給は一定の幅で変動しており、毎日の交通流状態はそれぞれ同一とは限らないとする。

以上の状況で、ある特定の時間帯（例：通勤時間帯の 1 時間）におけるリンク旅行時間、リンク交通量、OD 間交通量を求めたい。このとき、その時間帯に観測されたリンクの状態は現時間帯観測情報から推定し、未観測リンク状態は蓄積された過去観測情報とノードに

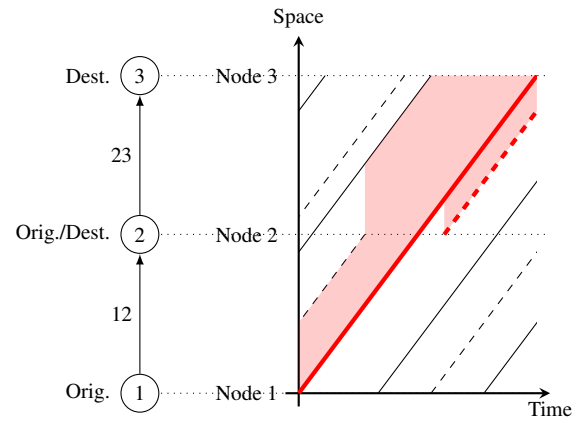


図-1 あるネットワーク上のプローブ情報の例

おける交通量保存則に基づく補完により推定することを考える。

(2) 観測リンクの交通流状態の推定

ある時間帯 t （長さ Δt ）にプローブが観測したリンク ij について、プローブの観測情報にのみ基づいたリンク旅行速度 $v_{ij}(t)$ 、リンク交通量 $q_{ij}(t)$ 、リンクの OD 別交通量 $q_{ij}^{od}(t)$ の推定手法を示す。

a) リンク旅行速度および交通量

観測リンク ij の交通流状態は、Edie の定義⁷⁾ を応用することで式 (1)–(3) のように推定できる。

$$\hat{q}_{ij}(t) = \frac{\sum_{n \in \mathbf{P}_{ij}(t)} d_n(t, ij)}{\sum_{n \in \mathbf{P}_{ij}(t)} |s_n(t, ij)|} \quad (1)$$

$$\hat{k}_{ij}(t) = \frac{\sum_{n \in \mathbf{P}_{ij}(t)} t_n(t, ij)}{\sum_{n \in \mathbf{P}_{ij}(t)} |s_n(t, ij)|} \quad (2)$$

$$\hat{v}_{ij}(t) = \frac{\sum_{n \in \mathbf{P}_{ij}(t)} d_n(t, ij)}{\sum_{n \in \mathbf{P}_{ij}(t)} t_n(t, ij)} \quad (3)$$

ここで、

$q_{ij}(t)$ - 時間帯 t にリンク ij を流れた全交通流の時空間平均流率（リンク交通量）

$k_{ij}(t)$ - 時間帯 t にリンク ij を流れた全交通流の時空間平均密度

$v_{ij}(t)$ - 時間帯 t にリンク ij を流れた全交通流の時空間平均速度（リンク旅行速度）

$\mathbf{P}_{ij}(t)$ - 時間帯 t にリンク ij を流れたプローブの集合

$d_n(t, ij)$ - 時間帯 t のリンク ij 上での車両 n の総走行距離

$t_n(t, ij)$ - 時間帯 t のリンク ij 上での車両 n の総走行時間

$|s_n(t, ij)|$ - 時間帯 t のリンク ij 上での車両 n とその先行車両との間の時空間領域の面積

である。なお、 $\hat{q}_{ij}(t)$ 、 $\hat{v}_{ij}(t)$ が不偏推定量となる十分条件の一つは、 $d_n(t, ij)$ が全ての n について一定であることである。これは、例えば ij 上の全ての車両が t の間に ij を走行し終わる、すなわち $l_{ij} \ll \Delta t v_{ij}(t)$ (l_{ij} はリンク ij の長さ) の場合に成り立つとみなせる。

b) リンクの OD 別交通量

式(1)をOD別に求めると、観測リンクのOD別交通量を式(4)のように推定できる。

$$\hat{q}_{ij}^{od}(t) = \frac{\sum_{n \in \mathbf{P}_{ij}^{od}(t)} d_n(t, ij)}{\sum_{n \in \mathbf{P}_{ij}(t)} |s_n(t, ij)|} \quad (4)$$

ここで、

$q_{ij}^{od}(t)$ - 時間帯 t にリンク ij を流れた交通流のうち、ODペアが od である交通流の時空間平均流率（リンクのOD別交通量）

$\mathbf{P}_{ij}^{od}(t)$ - 時間帯 t にリンク ij を流れ、ODペアが od であるプローブの集合

である。プローブごとにODが既知としているので、 $\mathbf{P}_{ij}(t)$ に加えて $\mathbf{P}_{ij}^{od}(t)$ が既知であることに注意されたい。なお、

$$\hat{q}_{ij}(t) = \sum_{od} \hat{q}_{ij}^{od}(t) \quad (5)$$

は常に成り立つ。

(3) ネットワーク全体の交通流状態の推定

以上によって推定された観測リンクの交通流状態から、未観測リンクを含むネットワーク全体の交通流状態を推定する手法を示す。

ここでは、静的な交通流を考え、ノードにおける交通量保存則およびプローブの過去観測情報を用いる。推定手法には、利用者均衡が成り立っていると仮定するアプローチと、それを仮定しないアプローチの2種を提案する。以下、それぞれについて記述する。

a) 均衡仮定アプローチ

ネットワークの一部リンクの旅行時間が観測されている場合、利用者均衡を仮定することにより未観測リンクの旅行時間を推定可能である (Iryo and Sumalee²⁾の手法)。当該手法は、Wardropの第一原則に基づき、利用された経路の代替経路の旅行時間を幅を持たせて推定するものである。これにより、未観測リンクの $\hat{v}_{ij}(t)$ が得られる。

未観測リンクの交通量は過去観測情報に基づき以下のように推定する。プローブが過去の長期間に渡って走行し、その推定情報(式(1), (2))を蓄積していたとすると、あるリンクの q - k 関係の頻度分布をノンパラメトリックに得られる(図-2)。これは q と v の関係、式(6)と表現できる。

$$q_{ij}(t) = f(v_{ij}(t)) \quad (6)$$

これに推定した $\hat{v}_{ij}(t)$ を代入することにより、 $\hat{q}_{ij}(t)$ が得られる。

以上のもと、式(7)で表される残差平方和最小化により、ネットワーク全体のリンク旅行速度 $\hat{v}_{ij}(t)$ 、リンク交通量 $\sum_{od} q_{ij}^{od}(t)^*$ 、OD別交通量 $q_{ij}^{od}(t)^*$ が推定できる。

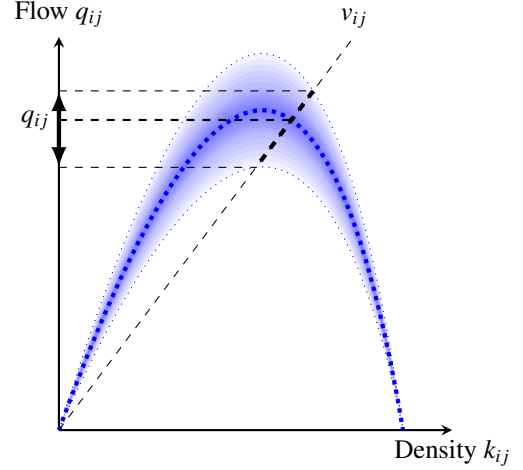


図-2 q - k 関係

$$\min \sum_{ij \in \mathbf{O}} \sum_{od} \left(q_{ij}^{od}(t)^* - \hat{q}_{ij}^{od}(t) \right)^2 + \alpha \sum_{ij \in \mathbf{U}} \left(\sum_{od} \left(q_{ij}^{od}(t)^* \right) - \hat{q}_{ij}(t) \right)^2 \quad (7)$$

subject to

$$\sum_i q_{ij}^{od}(t)^* - \sum_k q_{jk}^{od}(t)^* - \sum_o \sum_i q_{ij}^{oj}(t)^* + \sum_d \sum_k q_{jk}^{jd}(t)^* = 0 \quad \forall j \quad (8)$$

$$q_{ij}^{od}(t)^* \geq 0 \quad \forall q_{ij}^{od}(t)^* \quad (9)$$

ここに、

\mathbf{O} - 観測リンク集合

\mathbf{U} - 未観測リンク集合

α - 未観測リンクに関する重みづけパラメータ

である。制約条件(8)はノード j における交通量保存則を意味する。

b) 均衡を仮定しないアプローチ

利用者均衡を仮定しない場合、未観測リンクの情報は一切得られないこととなる。よって、解くべき残差平方和最小化問題は式(7)の $\alpha = 0$ とした形、式(10)で表され、観測リンクのリンク旅行速度 $\hat{v}_{ij}(t)$ と、ネットワーク全体のリンク交通量 $\sum_{od} q_{ij}^{od}(t)^*$ 、OD別交通量 $q_{ij}^{od}(t)^*$ が推定できる。

$$\min \sum_{ij \in \mathbf{O}} \sum_{od} \left(q_{ij}^{od}(t)^* - \hat{q}_{ij}^{od}(t) \right)^2 \quad (10)$$

subject to

$$\sum_i q_{ij}^{od}(t)^* - \sum_k q_{jk}^{od}(t)^* - \sum_o \sum_i q_{ij}^{oj}(t)^* + \sum_d \sum_k q_{jk}^{jd}(t)^* = 0 \quad \forall j \quad (11)$$

$$q_{ij}^{od}(t)^* \geq 0 \quad \forall q_{ij}^{od}(t)^* \quad (12)$$

このアプローチには、未観測リンクの旅行速度が推定不可能という問題がある。

3. おわりに

本研究では、車間距離測定プローブカーの利用を想定し、観測リンクのリンク旅行速度、リンク交通量、OD間交通量を推定する手法を示した。また、未観測リンクの状態を補完推定することでネットワーク全体の交通流を推定する手法を示した。本手法の特徴は、移動体観測のみに基づいており、定点観測や重大な外生的仮定 ($q-k$ 関係やプローブカー混入率等) に頼らない点である (ただし、未観測リンク状態を補完する際の均衡仮定アプローチでは利用者均衡を仮定している)。そのため、時空間的に広範囲に渡る道路ネットワーク交通流の推定が可能であるといえる。

本手法の限界としては、未観測リンク状態を補完しネットワーク全体の推定を行う際に、交通流の動的要素を無視している点がある。着目した時間帯内に全ての車両がその OD 間の旅行を終えるという想定を置いており、ボトルネックや渋滞の延伸等を明示的には考慮していない。さらに、均衡を仮定しないアプローチの場合、未観測リンクが自由流か渋滞流なのかを特定できないという問題がある。

今後の課題について述べる。まず、観測リンク状態の推定、未観測リンク状態の補完共に推定精度等の数値的特性を検証する必要がある。この際には、シミュレータ上での数値実験を用いることが考えられる (なお、式 (1)–(3) で求められる単一リンク交通量等については実道実験による検証を行っており、別の機会に報告の予定である)。また、未観測リンク状態の補完法に検討の余地が残されている。部分的に観測されたリン

ク交通量や OD 交通量等からネットワーク全体の交通流を推定する手法は既に多数提案 (たとえば楊ら⁸⁾) されており、それら計算手法の適用可能性がある。

謝辞： 本研究に関し、東京工業大学の日下部貴彦助教から様々な助言を頂いた。また、本研究の一部は(独)日本学術振興会の特別研究員 DC2 制度による助成を受けたものである。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 三輪富生, 山本俊行, 竹下知範, 森川高行: プローブカーの速度情報を用いた動的 OD 交通量の推定可能性に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 64, No. 2, pp. 252–265, 2008.
- 2) Iryo, T. and Sumalee, A.: A theory of travel time estimation under equilibrated traffic network and a special case with a complete OD network, in *Proceedings of the 86th Annual Transportation Research Board Meeting*, 2007.
- 3) 花岡洋平, 原祐輔, 片岡駿, 桑原雅夫: 長期間のプローブ走行データを用いた統計的交通状態推定に関する研究, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol. 48, 2013.
- 4) National Highway Traffic Safety Administration: Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles, Press Release, 2013.
- 5) 小谷益男, 古市朋輝, 児島正之, 岩崎征人: 高速道路単路部における連続的な交通容量推定手法とその有効性, 土木学会論文集, No. 737/IV-60, pp. 125–131, 2003.
- 6) 瀬尾亨, 日下部貴彦, 朝倉康夫: 車間距離測定プローブカーを用いた交通状態推定—データ同化手法による拡張—, 土木計画学研究・講演集, Vol. 48, 2013.
- 7) Edie, L.: Discussion of traffic stream measurements and definitions, in Almond, J. ed. *Proceedings of the 2nd International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, pp. 139–154, 1963.
- 8) 楊海, 朝倉康夫, 飯田恭敬, 佐佐木綱: 交通混雑を考慮した観測リンク交通量からの OD 交通量推計モデル, 土木学会論文集, No. 440/IV-16, pp. 117–124, 1992.

(2014. 4. 25 受付)

NETWORK TRAFFIC FLOW ESTIMATION USING LONGITUDINAL DATA OBSERVED BY PROBE VEHICLES WITH SPACING MEASURING EQUIPMENT

Toru SEO and Yasuo ASAKURA